

都市高速道路における予見的ファジィ流入制御の導入*

Introduction of Predictive Fuzzy Inflow Control for Urban Expressway *

奥嶋政嗣**・秋山孝正***

By Masashi OKUSHIMA**・Takamasa AKIYAMA***

1. はじめに

近年の各種情報技術の進展により、都市高速道路の交通管制において考慮すべき要素が多様化し、複雑性が増している。特に交通管制においては、交通状況観測技術、交通管理設備、利用車両の高度化にともなって、多様で複雑な情報に対応した効率的な制御判断が必要とされている。

一方、現実の交通管制の局面においては、交通需要量などの不確实现象を前提とした経験的な実用的知識の導入が必要となる。このため都市高速道路における流入制御にファジィ制御が提案され、既存の各種流入制御方式に含まれる知識の実用的利用方法が検討されている¹⁾²⁾。既存研究ではファジィ制御により、複数の制御目標に対するバランスを考慮した多目的制御が可能となることが示されている。

ここで都市高速道路の流入制御においては、非定常な交通状況における時間変化を考慮する必要がある。本研究では都市高速道路における流入制御に、交通状況変化の予見を内包した予見的ファジィ制御を適用する。これより、複雑で多様な交通管制条件に対応した効率的な制御に対して、交通状態の遷移過程での流入制御の有効性が高まる。

2. 予見的ファジィ制御による流入調整の提案

(1) 都市高速道路の流入制御

都市高速道路の流入制御に関しては、これまで数多くの知見が蓄積されている。これらは、①制御目標の最適化を図る方法、②制御の効率化を図る方法に大別される。

①制御目標の最適化：平常時における自然渋滞の予防を目的とする交通管制として提案されたLP制御は、代表的な流入制御モデルであり、方法論的に完成度が高い³⁾。LP制御に関しては、待ち行列制約の付加⁴⁾などの提案がなされている。また、本線交通量の非定常性を考慮した動的制御モデル⁵⁾、ドライバーの経路選択を考慮したモデル⁶⁾、

*キーワード：ファジィ流入制御、交通シミュレーション

**正員，博士(工)，岐阜大学工学部社会基盤工学科

(岐阜市柳戸1-1, TEL058-293-2446,FAX058-293-2446,

E-mail : okushima@cc.gifu-u.ac.jp)

***正員，工博，岐阜大学工学部社会基盤工学科

本線交通量の空間分布を考慮したモデル⁷⁾などへ応用されている。このように交通状況が臨界状態へ遷移する非定常な場合が考慮され、交通状況の時間変化に対応するために流入制御モデルの動学化が行われてきた。

②制御の効率化：都市高速道路においては、交通渋滞の緩和のために、入路の料金所での流入制御が実施されている。現行では、入口ブース数を変更するブース閉鎖制限方式が適用されている⁸⁾。これに対し、単位時間当たりの流入台数を詳細に調整する流入調整方式が検討されている⁹⁾。

ここで、既存の各種流入制御方式に含まれる知識の実用的利用により、効率的な制御を実現する方法として、ファジィ流入制御が提案されている¹⁰⁾。このとき、流入制御手順をファジィ推論で記述することにより、知識利用型の現実的交通制御が定式化可能としている¹⁾。これは多目標制御のルール形式の運用に対応している。このように、都市高速道路の流入制御に関して、非線形性を有する効率的な制御方法としてファジィ制御の有効性が示されている²⁾。

また、本研究で導入を検討する予見的ファジィ制御に関しても、交通管制への適用が提案されている¹¹⁾。これは、対象システムに関する熟練者の知識を用いて、対象システムの動的特性からその動きを予見し、システムの制御目的を多次元的に評価することの特徴としている¹²⁾⁻¹⁴⁾。

本研究では、時々刻々と変化する交通状況に関する多様で複雑な情報を処理し、効率的な制御判断の実行可能な方法として、ファジィ制御を基本とした流入調整方法を検討する。流入調整方式の適用に関して、交通状況の予見を内包した予見的ファジィ制御の導入を提案する。

(2) ファジィ流入制御の概要

ここでは、これまでに提案されているファジィ流入制御モデルについて概要を整理する。ファジィ制御モデルは、複数の制御目標に対する多目的制御の記述が可能である。また、特徴的な状況に対応した制御ルールの追加が比較的容易に実現できる。特に制御形式の構造的な特徴から、非線形性を有する効率的な制御が可能である。

既存研究において、交通管制官の主要な制御決定要因となる「渋滞長」、「入路待ち台数」、「流入需要量(5分間到着交通量)」の3要因により、「流入交通量」を決定

するファジィ制御モデル (FC0) が提案されている^{1), 2)}。これらの流入制御の決定要因は、それぞれの状態が3段階の言語変数により記述されている。

一方で、このモデル (FC0) を基本モデルとして、流入制御の決定要因、モデル構造などの基本的フレームを利用して、制御出力値を流入交通量とした各種の制御モデルが提案されている。ここでは制御出力値を5段階の言語変数を用いて制御ルールが規定されている。これらのファジィ流入制御モデルの特徴を表-1に整理する。

ここで交通状況の非定常性を考慮して「渋滞長の変化」を制御決定要因に取り入れたモデル (FC1) が提案されている¹⁵⁾。また、代表的な推論形式について、知識利用面から特徴が整理されている¹⁶⁾。ここでは product-sum-gravity 型のファジィ推論を用いたモデル (FC2) が実用面から推奨されている。

さらに、一般道路の交通状態に応じて制御量を調整するファジィ流入制御モデル (FC3) も提案されている¹⁷⁾。ここでは、都市高速道路の流入制御による、一般道路への迂回交通の影響を考慮するために、上記の4要因に加えて「迂回交通の代替経路所要時間」が制御要因として追加されている。このとき、制御ルールは25ルールとして再構成されている。このように、制御目的の追加に対しても柔軟に対応できることが示されている。

本研究では、予見的ファジィ流入制御の有用性を検討するために、既存のファジィ流入制御モデルと比較して分析を行う。これらのファジィ流入制御モデルはすべて、都市高速道路本線での交通渋滞発生後に流入交通量の抑制を実行する事後的制御である。これらの具体的な例として一般道路に関する判断の含まれるルール群をもつモデル (FC3) を用いることとする。

ここで交通状況が非定常な状態にある場合には、入口から隘路区間までの移動時間に相当する制御効果の時間遅れを考慮する必要がある。特に交通状況が臨界状態へ遷移する過程においては、交通状況の急激な変化に対応するため、少し先の交通状況を考慮する必要がある。したがって、本研究では交通状況の予見を内包した予見的ファジィ制御の導入を検討する。

(3) 予見的ファジィ流入制御の提案

ここでは、予見的ファジィ制御方式を基本とした流入制御方法について提案する。予見的ファジィ制御方式は、対象システムの将来の状態を予見する過程を制御判断に含むため、特に非飽和状態から飽和状態へ遷移する交通状況において有効に機能すると考えられる。

予見的ファジィ制御はシステム制御の分野で提案された制御手法である。対象システムの状況に応じて、実行可能な制御指令の効果を評価するとともに、不安定領域や危険領域への到達を回避するなど安定性、可制御性を考慮した

表-1 既存のファジィ流入制御モデルの比較

制御モデル	制御出力値	ルール数	推論形式	一般道路の交通状態	参考文献 No.
FC0	ブース制限パターン	8	MMG推論	—	2
FC1	流入交通量	22	MMG推論	—	15
FC2	流入交通量	22	PSG推論	—	16
FC3	流入交通量	25	PSG推論	明示的に考慮する	17

実システムに適する運用が可能であるとされている¹²⁾。

ここで予見的ファジィ制御の構造を図-1に示す。このとき、動的システムの制御は、①多数の制御目的の満足度のファジィ論理を用いた評価、②状況に応じた制御知識、③制御対象の動的特性を記述した予見システムの有機的結合により実現される。ここで、予見的ファジィ制御における制御ルールは次のように記述される。

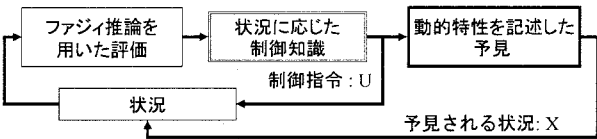


図-1 予見的ファジィ制御の構造

$$\text{if } (u \text{ is } C_i \rightarrow x \text{ is } A_i \text{ and } y \text{ is } B_i) \text{ then } u \text{ is } C_i \quad (1)$$

ただし、 u は制御指令、 x, y は制御目的に対する評価指標を示す。上記のルールは、「もし制御量 u を C_i とした場合、評価指標 x は A_i でありかつ評価指標 y は B_i であるならば、制御量 u を C_i とする。」といった制御則を表す。すなわち、制御量の仮定値に対して、制御目的となる被評価値を予見し、多目的評価のファジィ推論を行い、制御量を決定する方式である。制御目的となる被評価値の予見は、現時点の制御判断のために実行されるものであり、対象システムの動特性が比較的明確である場合に有効となる。

ここで、本研究で提案する予見的ファジィ流入制御の基本構造を図-2に示す。流入制御では複数の目標を同時に考慮することが必要となる。

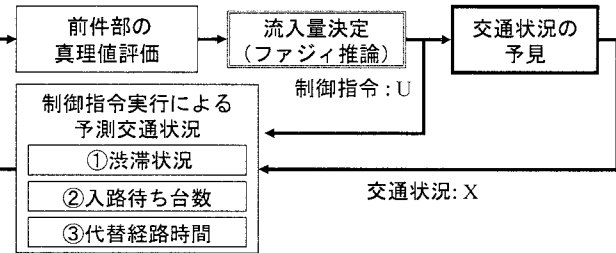


図-2 予見的ファジィ流入制御の基本構造

ここでは、既存研究の参考として、①高速道路本線の交通状態の改善、②流入待ち時間短縮、③一般道路への影響の抑制を制御目標としている。これらの制御目標が多次元的にファジィ評価されることになる。したがって、3種類の制御目標に対して、そのバランスを考慮した流入制御を実現することが可能となる。

前述のファジィ流入制御モデルとの主たる相違点は、制御量である流入交通量 u を C_i とした場合の、①渋滞状況・②入路待ち台数・③代替経路所要時間を予見する過程を含むことである。ここで、代替経路所要時間とは、一般道路への迂回交通の経路所要時間を表している。

このように、交通状況変化を予見し、各種の流入制御目標を直接評価することにより、交通状況変化により早く対応できる流入制御の運用を実現可能とする。したがって、予見的な側面も含めた多目的制御により、効率的な「流入交通量」の決定が可能となる。

3. 予見的ファジィ流入制御の記述

ここでは、予見的ファジィ流入制御モデルの制御決定要因と制御ルールについて整理し、推論過程で用いる交通状況の予見方法について説明する。これにより、具体的な予見的ファジィ流入制御のメカニズムを明らかにする。

(1) 制御決定要因

本研究の対象路線(11.7km)を図-3に示す。この路線は大阪市中心部の環状線と堺市とを結ぶ典型的な放射線である。当該路線では、環状線との合流部がボトルネックとなり、渋滞が頻繁に発生する。また路線内には、3箇所の入路、2箇所の出路与西大阪線への分流部が含まれている。

本研究では制御決定要因として、各制御量に対応する流入交通量を流入させた場合における15分後の交通状況の予見値を用いる。具体的には、以下に示す3種類の予見値を制御決定要因とする。制御決定要因としては、既存研究を参考に、評価対象となるものを選定した。

①渋滞長の予見値(ECN)：当該路線では500mごとに観測値に基づく渋滞判定がなされている。この渋滞区間の区間長を合計することにより渋滞長を算定している。

②入路待ち台数の予見値(EQU)：入路待ち台数は、流入待ち時間に対応する。なお、評価指標としては対象路線の3入路(堺入口・住之江入口・玉出入口)の合計値で表す。

③迂回交通所要時間の予見値(EDT)：迂回交通の利用経路となる代表区間の所要時間情報の合計として算定する。ここでは、制御対象路線の代替経路となる国道26号線の堺安井町～なんばまでの北向き区間を代表区間とする。

これらの制御決定要因のメンバシップ関数を図-4に示す。ここでは、前章で整理した既存研究のファジィ流入制御における制御決定要因と同様な設定としている。

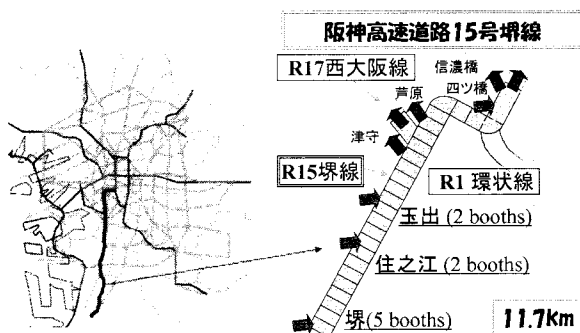


図-3 対象道路網と制御対象路線

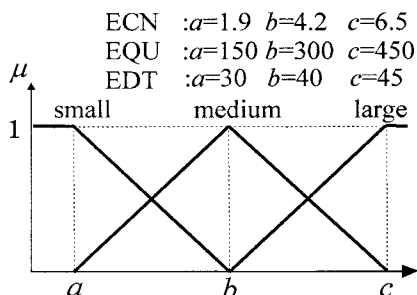


図-4 メンバシップ関数(制御要因)

(2) 制御量と制御ルール群の構成

ここでは、既存研究を参考として予見的ファジィ流入制御の制御量となる流入交通量(IFW)について言語変数を定義し、予見式を内包した流入制御ルール群を作成する。

流入交通量は5段階の言語変数を用いて表す。ここで、流入交通量のメンバシップ関数を図-5に示す。このとき、対象路線の3入路のすべてのブースを開放した場合の通過可能台数が出力値の最大値となる380台に相当する。

流入交通量のメンバシップ関数は等幅で対称な三角形分布を用いた。また、交通状況の予見式に与える流入交通量の仮定値は、各段階の三角形分布の頂点に相当するクリスプ値(180, 230, 280, 330, 380)として設定した。

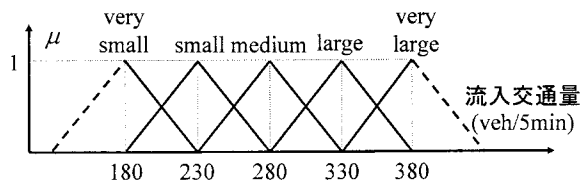


図-5 メンバシップ関数(流入交通量)

次に制御ルール群の構成について説明する。本研究で提案する予見的ファジィ制御ルール群を図-6に示す。ここで、制御ルール群は5段階の制御指令(流入交通量)に対応して設定されている。例えばルール PR-02 は「流入交

通量を多くしたとき、渋滞予見値が大きくないならば、流入交通量を多くする」という制御知識を表現している。各段階において3種類の制御要因に対応する判断を検討した。

各段階において本線の渋滞状況による判断と、流入待ち時間および一般道路への影響の判断の2種類を検討した。

ここで一般道路への影響の判断はPR-05, PR-07, PR-08の3ルールである。これらのすべてのルールは、一般道路の所要時間が増大する場合にのみ稼働する。したがって、一般道路の交通渋滞が増大する場合にのみ、制御判断（流入交通量）に影響を与える。

ここで制御ルールを整理した結果、最終的に8ルールで制御を記述することが可能となった。同様な流入制御に関する制御知識を利用したファジィ制御の25ルールと比較して数少ないルールで制御を記述できた。これは渋滞状況の変化傾向を予見部分で直接表現していることに起因する。予見式の導入により、少数のルールで複数の制御目的のバランスを考慮した制御が可能であることを示している。

(3) 流入交通量の決定プロセス

ここでは、交通状況の予見を含む流入交通量の具体的な決定プロセスを構築する。流入交通量決定の概略フローを図-7に示す。前提として、本線区間の存在台数が観測値として与えられ、前節で説明したように5段階の流入交通量の仮定値がそれぞれ所与されるものとする。また、流入需要量は時刻別平日平均値に等しいとする。

まず、推論過程で用いる15分後の交通状況予見値の算出方法について説明する。本研究では、交通流の特性に基づく渋滞長・入路待ち台数・迂回交通の所要時間の予見式を作成した。以下に渋滞長の算定手順を整理する。

①流入車両到達量：入路 i からの流入車両が予見時間 $CT(=15$ 分)以内に区間 a へ到達する確率 QE_{ia} は、本線旅行時間 T_{ia} と区間 a を含む経路の選択確率 PE_{ia} を用いて式(2)のように記述できる。

$$\begin{cases} QE_{ia} = PE_{ia} \cdot (CT - T_{ia}) / CT & (CT > T_{ia}) \\ QE_{ia} = 0 & (CT \leq T_{ia}) \end{cases} \quad (2)$$

このとき、入路 i からの流入車両到達量は到達率 QE_{ia} と流入交通量 U_i の積で表される。

②本線車両到達量：上流側区間 j からの到達率 QS_{ja} も同様に定義できる。このとき、区間 j からの到達量は到達率 QS_{ja} と存在台数 $mk_j l_j$ （交通密度 k_j 、区間長 l_j 、車線数 m ）の積で表される。

③通過需要量：区間 a における予見時間 CT 以内の通過需要量 A_a は、本線走行車両と流入車両の到達量を合算し、式(3)のように記述できる。

$$A_a = \sum_i U_i \cdot QE_{ia} + \sum_j m \cdot k_j \cdot l_j \cdot QS_{ja} \quad (3)$$

④通過可能量：区間 a における予見時間 CT 以内の

PR-01:IF	IFW is very large	→ ECN is small	THEN	IFW is very large
PR-02:IF	IFW is large	→ ECN is not large	THEN	IFW is large
PR-03:IF	IFW is large	→ EQU is not large	THEN	IFW is large
PR-04:IF	IFW is medium	→ ECN is not large	THEN	IFW is medium
PR-05:IF	IFW is medium	→ EQU is not large and EDT is not large	THEN	IFW is medium
PR-06:IF	IFW is small	→ ECN is not large	THEN	IFW is small
PR-07:IF	IFW is small	→ EQU is not large and EDT is not large	THEN	IFW is small
PR-08:IF	IFW is very small	→ EQU is not large and EDT is not large	THEN	IFW is very small

ECN: 渋滞長の予見値, EQU: 入路待ち台数の予見値
EDT: 迂回交通所要時間の予見値, IFW: 流入交通量

図-6 予見的ファジィ制御ルールの構成

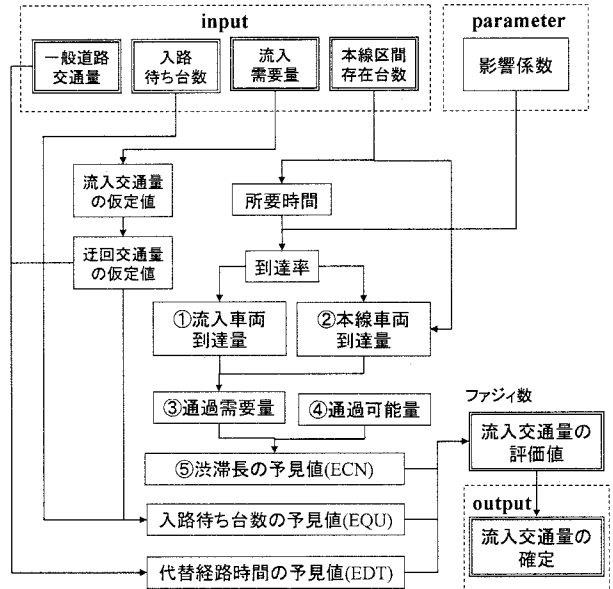


図-7 流入交通量の決定プロセス

通過可能量 D_a は、速度-密度関係にドレイク式を設定し、式(4)のように表現する。

$$D_a = m \cdot k_a \cdot V_f \cdot e^{\frac{-1}{2} \left(\frac{k_a}{k_c} \right)^2} \cdot CT / 60 \quad (4)$$

なお $k_c = 61.8$ [台/km] として臨界容量を設定する。

⑤渋滞長の予見値：制御時点での観測された渋滞長 (CON) に対して、隘路区間 a の通過需要量と通過可能量の差により、渋滞長を式(5)のように予見する。

$$ECN = CON + (A_a - D_a) / m \cdot k_a \quad (5)$$

このように、交通流の基本的な特性に基づく渋滞長 (ECN) の予見式を作成している。

一方、流入需要量は時刻別平日平均値に等しいと仮定しているため、入路待ち台数 (EQU) については、現在の入路待ち台数の観測値 (QUE) に対して、流入需要量の時刻別平日平均値 U_d と流入交通量 U_i を用いて、式(6)のように表現する。

$$EQU = QUE - \sum_i U_i + \sum_i U_d \quad (6)$$

また、代替経路時間 (EDT) は迂回交通量 S_j と一般道路の代替経路に含まれる区間 j における当該時間交通量 B_j およびリンクコスト関数 $C_j(*)$ を用いて式(7)のように表現する。

$$EDT = \sum_j C_j(B_j + S_j) \quad (7)$$

これら3種類の予見値に対してファジィ評価を行い、流入交通量の評価値を算出し、product-sum-gravity 型のファジィ推論を用いて流入交通量を確定する¹⁸⁾。

このように、交通状況に対する予見式を内包したファジィ流入制御モデルが構築され、具体的な予見的ファジィ流入制御のメカニズムが整理された。

4. 予見的ファジィ流入制御の適用

前章までに予見的ファジィ流入制御モデルの定式化がなされた。ここでは、制御効果を評価するための交通シミュレーションによる交通状況推計システムを構築するとともに、具体的な制御効果について分析をおこなう。

(1) 交通シミュレーションによる推計過程

予見的ファジィ流入制御モデルにより規定される制御内容を評価するため、交通シミュレーションを利用する¹⁹⁾。本研究では一般道路への流入制御の影響を分析可能な推計方法として図-8に示す交通状況推計システムを構築した。

ここでの一般道路の交通状況推計方法については、都市高速道路での流入制御による一般道路への迂回交通の影響により、一般道路の交通混雑が増大する可能性の有無を推計する必要がある。都市高速道路の交通制御において、現実的にも一般道路の交通状況において短時間の観測値を利用するのではなく、時間帯程度の交通変化が検討対象である。本研究では、このような形式の制御に対応して、一般道路の交通状況推計に時間帯別交通量配分を用いる。

具体的には、都市高速道路の本線上の交通シミュレーション結果として渋滞長を算定する。その渋滞長に対して経路選択確率を定義し、迂回交通量を算定する。

ここで「迂回交通量」とは、「都市高速道路の利用を予定している車両が、予定したオンランプからの流入を取りやめて、一般道路を走行する交通量」であると定義する。したがって、本線走行車両が予定出口よりも手前の出口にて流出し、一般道路を走行するものは「迂回交通量」に含

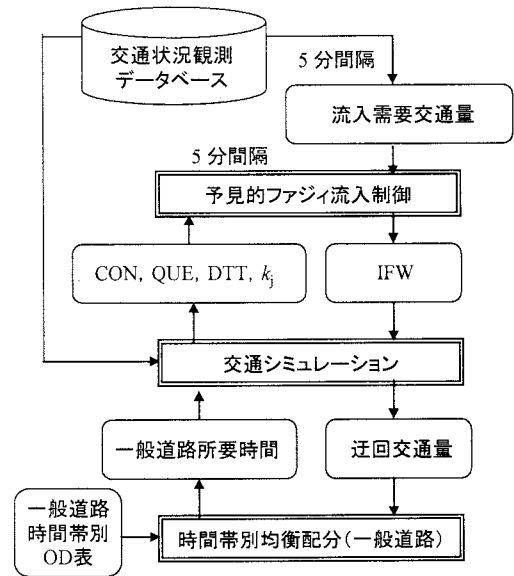


図-8 交通流動推計システム

まれていない。この「迂回交通量」を一般道路の交通需要とあわせて、時間帯別に一般道路ネットワークに対して配分し、一般道路での旅行時間の変化を算定する。

ここで実際に時間帯別配分の対象となるOD表は、①高速道路を利用しない交通、②オンランプへのアクセス、③オフランプからのイグレス、④ランプ間の迂回交通の4種類で構成される。このように、都市高速道路だけでなく一般道路を含めた交通状況の統合的分析が可能な交通流動推計システムを用いて、流入制御効果の評価を行う。

つぎに、都市高速道路本線上の交通状況に対して、各入口で都市高速道路への流入を取りやめ、一般道路へ迂回する利用者の割合について検討する。既存の関連研究において、対象路線である阪神高速道路公団の利用者アンケート調査結果に基づき、本線の渋滞長に対応した流入需要量に対する一般道路への迂回率の記述がなされている¹⁷⁾。具体的には、式(8)に示す迂回率式が提案されている。

$$P = \frac{1}{1 + \exp(-0.66 \cdot L + 4.1)} \quad (8)$$

ここで、 P ：流入車両の一般道路への迂回率、 L ：当該ランプから環状線までの利用区間の渋滞長(km)である。

このとき、迂回交通量は流入予定入口で経路を変更し、一般道路を走行する交通である。このため、一般道路ネットワークでは、オンランプ接続ノードからオフランプ接続ノードまでの経路に負荷されることとなる¹¹⁾。また、この流入需要量に対する迂回率式で算定された迂回交通量を差し引いた流入需要台数について、オンランプ上流側の料金所待ち可能台数を超過している場合には、その超過台数について迂回交通量に加算した。

ここで、検証結果は迂回率の設定に大きく依存するが、作成した迂回率式は、流入制御状況、交通情報提供などに対する利用者の交通行動を詳細に記述するものではない。このため、より詳細な検討のためには、都市高速道路本線上の渋滞長に加えて、制御強度などの利用者の行動変化を促進する要因の導入による精度向上が必要である。さらには、個々のオンランプごとに一般道路の迂回経路距離などを考慮すると、経路変更判断も異なることが考えられるため、経路長を考慮したモデルとすることも必要である²⁰⁾。

このように、都市高速道路の交通シミュレーションモデルに対して、一般道路の時間帯別交通量配分モデルを統合した交通流動推計システムを構築した。これより、都市高速道路だけでなく、制御実施による一般道路への迂回交通の影響を考慮した制御効果の検証が可能となった。

(2) 予見的ファジィ流入制御の効果

ここでは、予見的ファジィ流入制御モデルの適用性を検証するために、現行制御方式およびファジィ制御と比較し、提案したモデルの制御特性を明確にする。ここで、具体的には平成9年10月14日の車両検知器計測データを用いて、6:00～10:00までの4時間帯について交通状況推計を行った。なお、同日の交通状況は平日の一般的な交通状況となっている。それぞれの制御方式について、流入制御効果としての交通状況の推計結果を比較して表-2に示す。

ここで、一般道路の総所要時間については、流入制御を実施した場合の交通状況における総所要時間と、流入制御を実施しない場合の交通状況に対応する総所要時間差を示している。

予見的ファジィ制御の適用により、現行制御方式と比較して1336時間、ファジィ制御方式と比較しても347時間、本線の総所要時間の大幅な短縮が見込まれる。

つぎに、オンランプ部の流入総待ち時間については、現行制御方式と比較して436時間大きく、ファジィ制御モデルと比較して47時間大きい。

また、本線所要時間と流入待ち時間を合算した本線利用車両の総所要時間については、既存の制御方式よりも短縮される。流入交通量は、現行制御方式と比較して523台少ないものの、ファジィ制御と比較すると76台多い。これは本線の渋滞緩和により迂回率が少なくなっていることによると考えられる。これより、既存の制御方式と比較して本線利用車両に対する制御効果が示された。

一方、一般道路への影響をみてみると、流入交通量の相違に対応して、つまり迂回交通量に応じて、迂回交通による総所要時間が多くなっている。一般道路と都市高速道路では、推計手法自体が異なっているため、総所要時間を単純に合計して比較することはできない。

予見的ファジィ制御方式では、ファジィ制御方式と比較

表-2 予見的ファジィ制御による流入制御効果

推計結果 6:00-10:00			パターン制御 (現行方式)	ファジィ制御	予見的 ファジィ制御
総所要時間 (Hour)	本線	走行時間	4337	3348	3001
		待ち時間	81	470	517
		計	4418	3818	3518
	一般道路	増分	689	902	820
流入交通量	Total	veh	14085	13486	13562

して、一般道路の総所要時間は82時間少ない。したがって、一般道路への影響の面からも、予見的ファジィ制御の有効性が確認できる。しかしながら、現行制御方式と比較すると一般道路の総所要時間は131時間多い。すなわち、現行制御方式よりも一般道路への影響は大きく、一般道路の交通状況により配慮する必要があるといえる。

ここで、既存研究において、都市高速道路のランプ流入制御について、一般道路が代替経路となる典型的な条件下であれば、サービス水準の高い経路（都市高速道路）へ、交通容量の上限まで交通需要を割り当てることがシステム最適状態となることが示されている²¹⁾。このため、都市高速道路の交通渋滞と流入交通量の時間推移について分析を行うこととする。

(3) 予見的ファジィ流入制御の時間推移の特徴

ここでは、ファジィ流入制御と予見的ファジィ流入制御の渋滞状況の時間的变化について、その特徴を比較する。ファジィ流入制御の適用時の渋滞状況の時間変化を図-9に示す。また、予見的ファジィ流入制御適用時の渋滞状況の時間変化を図-10に示す。

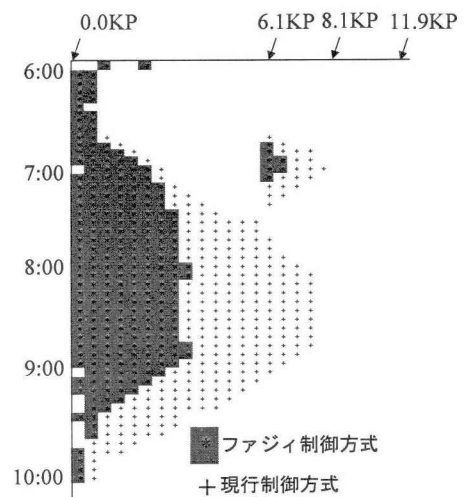


図-9 ファジィ制御時の交通渋滞

ここでは、区間平均速度が 30 km/h 以下の区間を渋滞区間として、「*」で示している。

ファジィ流入制御では、渋滞量(渋滞区間長と渋滞時間との積)は現行制御方式と比較して50%少ない。予見的ファジィ流入制御では、同様に現行制御方式と比較して69%少ない。このとき、渋滞延伸の開始時刻がファジィ制御方式と比べて遅く、予見による効果として渋滞発生を抑制する予防的な制御の側面があることがわかる。また、渋滞発生を抑制することで全体として高い制御効果を得ている。

最大渋滞長については、ファジィ制御、予見的ファジィ制御ともに4.5kmとなっており、ファジィ制御についても渋滞発生時を除いては有効に機能していることがわかる。

つぎに都市高速道路本線の所要時間を比較する。ここでは、3種類の制御方式の適用時における堺本線料金所から環状線合流部までの所要時間について図-11に示す。

ピーク時間である8:00における所要時間では、ファジィ制御、予見的ファジィ制御ともに、現行制御方式と比較して12分短い。予見的ファジィ制御における結果の特徴としては7:15までは渋滞が発生していないため、所要時間がほぼ一定で12分と低い値になっていることである。このように、渋滞の発生時および延伸時である交通状況が急激に変化する非定常な遷移過程において、予見的ファジィ流入制御の特徴が生かされ、制御効果が高いものと考えられる。

次に予見的ファジィ流入制御の特徴を分析するため、制御量である流入交通量の時間変化について、ファジィ制御適用時の結果と比較して図-12に示す。

予見的ファジィ制御では、渋滞量が少ない時間帯(6:30-7:00)においても流入交通量を抑制することにより、その後の渋滞延伸を抑制する結果を得ている。また、渋滞延伸時間帯(7:30-8:10)で流入交通量がさらに抑制される。一方、渋滞解消時間帯(8:40-9:10)においては早い時期に流入交通量の抑制程度が緩和される。このように、若干時間を先行して交通状況を考慮した流入交通量の決定をおこなう予見的ファジィ制御の特徴が現れている。

つぎに、予見的ファジィ流入制御に対応する流入台数、超過台数および迂回台数の時間変化を分析する。これら3種類の交通制御諸量の時間変化を図-13に示す。

ここで超過台数とは、オンランプへの交通需要量と流入交通量の差である。本線の交通渋滞の延伸開始時刻(7:15)までは、超過台数が増加しており、7:30にピークとなる。以降の時間帯では超過台数が徐々に減少していく。

一方で、迂回交通量は渋滞延伸にともなって増加していく。渋滞長が最大となる8:00にピークとなり、5分間に123台が都市高速利用を取りやめ一般道路へ迂回している。

また、迂回交通の所要時間推移についても、図-14に示す。この迂回交通の所要時間推移についても、予見的ファジィ制御の特徴がみられる。ピーク直前の時間帯である、7:00-7:30で迂回交通が、現行制御方式やファジィ制御方式と比較して小さく、その後の7:30-9:00に迂回交通が多くなっている。

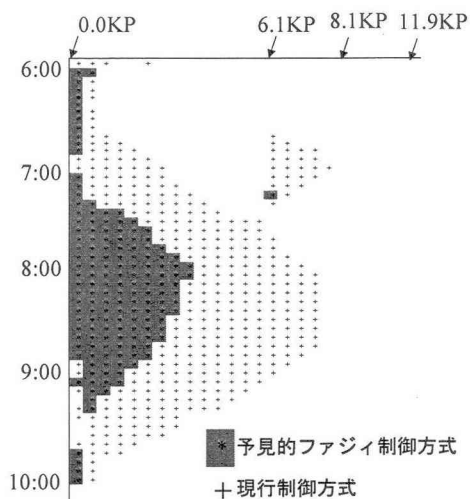


図-10 予見的制御時の交通渋滞

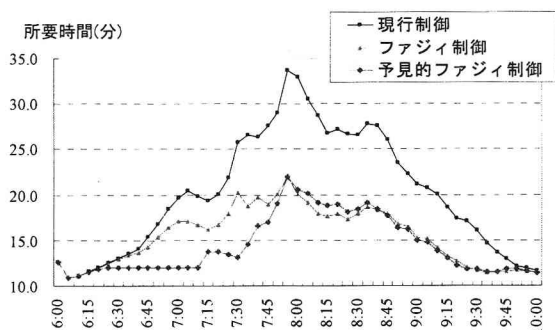


図-11 都市高速道路の所要時間変化

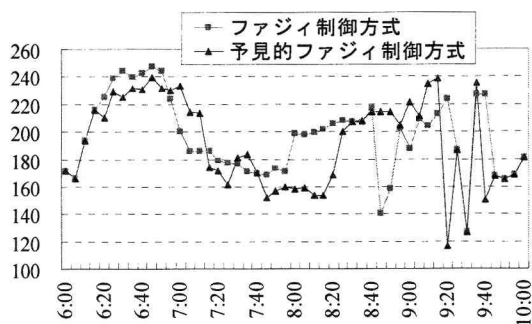


図-12 流入交通量の時間変化

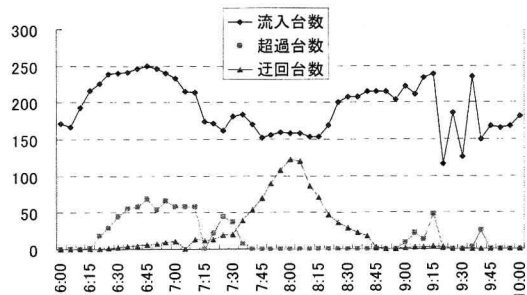


図-13 交通制御諸量の時間変化

このように、各時間帯における所要時間の平滑化が図られることが示された。

(4) 適用可能性の検討

ここでは、予見的ファジィ制御の適用性を検討するために、先ほどまでとは異なる日（平成13年9月）の交通状況に対して、予見的ファジィ制御による制御効果を推計した。この適用性の検討結果を表―3に示す。

ここでの対象日の交通状況は、流入需要量が先ほどまでの検討ケースと比較して、約5%多い状態であった。ここでも、前節までの検討結果と同様に、現行制御方式と比較してファジィ制御が有効となり、さらに予見的ファジィ制御が有効である結果となった。ここではある1日のみを対象に適用性を検討したため、一概に予見的ファジィ制御の適用性を示したものではない。このため、都市高速道路における長期間の交通状況の蓄積データを利用して、予見的ファジィ制御の適用性を検証していく必要がある。また、感度分析などにより、予見値の推計精度に関わらず、制御モデルが有効であることを検証することも必要である。

つぎに、一般道路交通状況を考慮することの有用性について検討する。ここでは、提案した予見的ファジィ制御の制御ルールをルール群Aとする。一方、一般道路への影響の判断に関わるルールPR-05、PR-07、PR-08を変更したルールをルール群Bとする。ルール群Bを図―15に示す。

これら2種類のルール群について、予見的ファジィ流入制御の制御効果を比較する。具体的な各モデルを用いた交通制御結果を表―4に示す。ルール群Aを用いた制御結果と比較して、都市高速道路の総所要時間差はわずかである。このように、流入制御において一般道路の交通状況を考慮することの本線交通渋滞への影響は少ない。

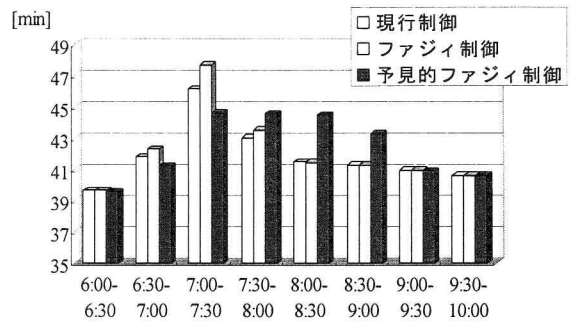
一方、一般道路の総所要時間については、ルール群Bを用いた制御結果では、62時間増大する。このように、都市高速道路の流入制御において、一般道路交通状況を考慮することで、一般道路への影響を抑制できる可能性がある。

つぎに、ルール群Bを用いた制御結果として、都市高速道路の交通渋滞状況の時間変化を図―16に示す。

ルール群Aを用いた制御結果である図―10と比較して、本線の交通渋滞状況の相違はわずかである。これは、2種類のルール群について、一般道路の所要時間が大きい場合に、制御判断（流入交通量）が異なるためである。具体的には、流入交通量に10台以上の差があるのは、8:25-8:40の時間帯の15分間である。このように、流入交通量の時間変化についても大きな相違はない。

つぎに、予見的ファジィ流入制御の適用性の課題を整理する。課題点は以下の4点が挙げられる。

- ①リアルタイムでの運用においても、予見部分の算定が必要となるため、高い計算処理能力が求められる。
- ②制御による流入交通量の変動幅が大きく、現実のオンラ



図―14 一般道路代替経路の所要時間推移

表―3 適用可能性の検討結果

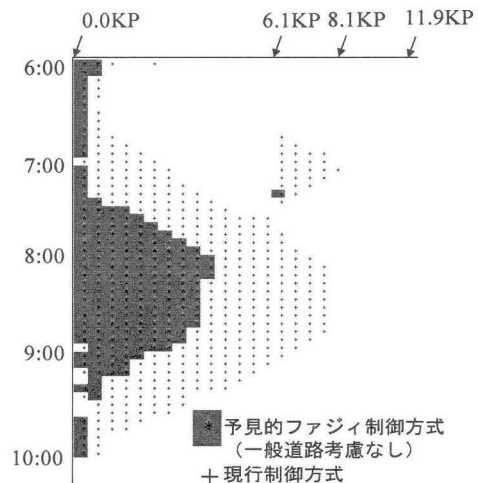
推計結果 6:00-10:00			パターン制御 (現行方式)	ファジィ制御	予見的 ファジィ制御
総所要時間 (Hour)	本線	走行時間	5638	4352	3901
		待ち時間	105	611	672
		計	5743	4963	4573
	一般道路	増分	758	992	902
流入交通量	Total	veh	14789	14160	14240

PR-05':IF IFW is medium → EQU is not large
THEN IFW is medium
PR-07':IF IFW is small → EQU is not large
THEN IFW is small
PR-08':IF IFW is very small → EQU is not large
THEN IFW is very small

図―15 制御ルール群B

表―4 制御ルール群Bによる制御結果

推計結果 6:00-10:00			ルール群A	ルール群B
総所要時間 (Hour)	本線	走行時間	3001	2992
		待ち時間	517	527
		計	3518	3521
	一般道路	増分	820	882
流入交通量	Total	veh	13562	13521



図―16 制御ルール群Bによる交通渋滞の時間変化

ンブでの流入制御では、急激な流入間隔（流入処理時間）の変更が必要とされるため、技術的側面および交通安全面から実用性を検討する必要がある。

③制御ルールの意味づけでは、前件部の意味解釈が容易ではなく、ファジィ制御方式ルールより理解が求めにくい。

④環状線などの複数路線の流入制御への適用のためには、各入路への流入交通量の割り当てを交通状況変化に応じて決定する方法への拡張が必要である。

現実の複雑性を考えるとさらなる課題点が存在しうると考えられる。このように実用化には多くの課題が残されているが、これらの課題が解決されたとき、都市高速道路の流入制御において、予見的ファジィ制御が適用可能となる。

5. おわりに

本研究では、都市高速道路の流入制御として予見的ファジィ制御の導入を検討した。これより、予防的な側面も含めた柔軟な多目標制御の達成を意図している。

交通状態の遷移過程での、制御効果が期待できる予見的ファジィ制御の実用化のためには、現実的な適用性の課題を解決していく必要がある。本研究の成果は、以下のよう整理できる。

- ① 都市高速道路の流入制御に、交通状況の予見式を内包した予見的ファジィ制御モデルを提案した。これより交通流動特性に応じた予防的な流入制御を可能とした。特に交通状況の遷移過程において予見を行うことの有効性が顕著となる。
- ② 少数のファジィルールが相互補完的に機能することで、複数の制御目的のバランスを考慮した制御が可能であることを示した。
- ③ 予見的ファジィ制御では、予見的ルールの効果により、それぞれ時間帯について所要時間の平均化が図られることがわかった。

また、今後の課題としては、次の点が指摘される。

- ① 個々の入路において需要量のバランスの変動に対応するために、各入路への流入交通量の適正な割当てを考慮した制御方法の検討が必要である。
- ② 流入調整による交通制御を実施するための現実的課題として、流入交通量変動の急激な上下を抑制するための調整方法の検討が必要である。
- ③ 現実の流入制御への適用のためには、環状線などのより複雑な交通制御に適用するために、路線単位での制御との整合の検討が必要である。

【謝辞】本研究で提案した流入制御方法は、「阪神高速道路の交通渋滞対策に関する調査研究委員会」での議論を参考としたものであり、ここに記して感謝の意を表します。また、本研究は、平成16年度科学研究費補助金若手研究(B)15760395の研究成果の一部であることを付記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Tsuna Sasaki and Takamasa Akiyama ; “Fuzzy on-ramp control model on urban expressway and its extension”, Proceeding of the 10th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, pp. 377-395.
- 2) 秋山 孝正, 佐佐木 綱 : ファジィ流入制御モデルを用いた交通制御方法の評価と検討, 土木学会論文集, 第413号/IV-12, pp. 77-86, 1990.
- 3) 佐佐木綱, 明神証 : 都市高速道路における流入制御理論, 交通工学, Vol. 3, No. 3, pp. 8-16, 1968.
- 4) 明神証, 坂本破魔雄, 岩本俊輔 : 待ち行列を考慮したLP制御, 交通工学, Vol. 10, No. 4, pp. 15-23, 1975.
- 5) 松井寛, 佐藤佳郎 : 都市高速道路の動的流入制御理論に関する研究, 土木学会論文集, No. 326, pp. 103-114, 1982.
- 6) 飯田恭敬, 朝倉康夫, 田中啓之 : 複数経路を持つ都市高速道路網における最適流入制御モデルの定式化と解法, 土木学会論文集, No. 449 / IV-17, pp. 135-144, 1992.
- 7) 松井寛, 藤田素弘, 堀尾朋宏 : 交通量の空間的分布を考慮したファジィLP制御, 土木計画学研究・論文集, No. 10, pp. 95-102, 1992.
- 8) 阪神高速道路公団・(財)高速道路調査会 : 阪神高速道路の交通管制に関する研究報告書, 1983.
- 9) 武井克見, 雪本雄彦, 奥嶋雅嗣, 大藤武彦 : 都市高速道路における流入調整方式による入路制御手法の評価, 第21回交通工学研究発表会論文集, pp. 233-236, 2001.
- 10) 秋山孝正, 佐佐木綱, 奥村透, 広川誠一 : ファジィ流入制御モデルの作成と検討, 土木計画学研究・論文集, No. 4, pp. 93-100, 1986.
- 11) 井上 博司, 宇野 巧 : 予見ファジィ制御理論を用いた都市高速道路の流入制御, 土木計画学研究・講演集, No. 21(1), pp. 419-422, 1998.
- 12) 安信誠二, 宮本捷二, 井原広一 : 予見的 Fuzzy 制御方式による列車自動運転, システムと制御, Vol. 20, No. 10, pp. 605-613, 1984.
- 13) 安信誠二 : ファジィ工学, 昭晃堂, 1991.
- 14) 日本ファジィ学会編 : 講座ファジィ第5巻「ファジィ制御」, 日刊工業新聞社, 1993.
- 15) Masashi Okushima, Yoshiharu Takihi, Takamasa Akiyama : Fuzzy Traffic Controller in Ramp Metering of Urban Expressway, Journal of Advanced Computational Intelligence & Intelligent Informatics, Vol. 7/No. 2, pp. 207-214, 2003.
- 16) 奥嶋政嗣, 秋山孝正 : 高度情報化に対応した都市高速道路のファジィ交通制御の提案, 第20回ファジィシステムシンポジウム論文集, pp. 105-108 2004.

- 17) 奥嶋政嗣, 秋山孝正: 一般道路を考慮した都市高速道路交通管理へのファジィ流入制御方法の導入, 第2回ITSシンポジウム論文集, pp. 105-110, 2003.
- 18) 水本雅春: 推論の合成則によるファジィ推論法(第5章ファジィ推論・第5.2.2節), ファジィとソフトウェアコンピューティングハンドブック(日本ファジィ学会編), pp. 113-120, 共立出版, 2000.
- 19) 奥嶋政嗣, 大窪剛文, 大藤武彦: 都市高速道路における交通管理施策評価のための交通シミュレーションシステム開発, 土木計画学研究・論文集, Vol. 20, No. 3, pp. 531-538, 2003.
- 20) 高野明, 宇野伸宏, 飯田恭敬, 長沼敏彦: 経路選択行動分析に基づく都市高速道路の交通管制方策評価, 第21回交通工学研究発表会論文報告集, pp.329-332, 2001.
- 21) 桑原雅夫, 吉井稔雄, 熊谷香太郎: 動的システム最適配分とランプ流入制御に関する研究—簡略ネットワークにおける基礎的分析—, 土木学会論文集, No. 667 / IV-50, pp. .59-71, 2001.

都市高速道路における予見的ファジィ流入制御の導入*

奥嶋政嗣**・秋山孝正***

近年の各種情報技術の進展により, 都市高速道路の交通制御においては, 交通状況観測技術, 交通管理設備, 利用車両の高度化にともなって, 多様で複雑な情報に対応した効率的な制御判断が必要とされている。これまでに, 都市高速道路における流入制御にファジィ制御が提案され, 既存の各種流入制御方式に含まれる知識の実用的利用方法が検討されている。ここで都市高速道路の流入制御においては, 非定常な交通状況における時間変化を考慮する必要がある。本研究では都市高速道路における流入制御に, 交通状況変化の予見を内包した予見的ファジィ制御を適用する。これより, 複雑で多様な交通制御条件に対応した効率的な制御に対して, 交通状態の遷移過程での流入制御の有効性が高まる。

Introduction of Predictive Fuzzy Inflow Control for Urban Expressway

By Masashi OKUSHIMA**・Takamasa AKIYAMA ***

The dynamic change of traffic condition is always monitored in traffic control centre. Therefore, it seems to be profitable to consider the estimation of traffic change in near future. The predictive fuzzy controller has been proposed to realize the decision mechanism to consider the future influence. Therefore, the predictive fuzzy logic controller might be regarded as an adaptive way to the dynamic change of traffic conditions. It is confirmed as well that the predictive fuzzy logic controller provide dynamically the efficient traffic flow on urban expressway as an advanced traffic control measure. Therefore, the combination of intelligent devices as ETC and the advanced traffic control technique show the direction of future effective traffic management on urban expressway.